

内部境界条件としての微高地の取込み方法が 浸水予測結果に与える影響—拡散型氾濫形態を 有する低平地農地流域を対象として—

THE INFLUENCE OF CONSIDERING MICRO EMBANKMENTS AS INTERNAL
BOUNDARY CONDITIONS ON INUNDATION PREDICTION RESULT
IN THE CASE OF LOW-LYING AND AGRICULTURAL AREA

武内慶了¹・伊藤弘之²・荒木千博³・古賀達也⁴・三浦心⁴・箕浦靖久³
Yoshinori TAKEUCHI, Hiroyuki ITO, Kazuhiro ARAKI, Tatsuya KOGA, Shin MIURA and
Yasuhisa MINOURA

¹正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 企画部 企画課
(〒305-0804 つくば市旭1番地)

²正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 水害研究室 (同上)

³正会員 博(工) 株式会社建設技術研究所 水システム部 (〒103-8430 中央区日本橋浜町3-21-1)

⁴正会員 工修 株式会社建設技術研究所 水システム部 (同上)

This study examined the 2-dimensional inundation simulation model of low-lying agricultural area to assess the impacts of incorporating micro embankments such as small roads or ridges between rice fields, and developed a model that allows fast and accurate prediction applicable to such systems as real-time inundation forecasting systems.

The results of the study showed that 5m grid model representing the micro topography obtained by LP (Laser Profiler) data takes time to calculate, but can accurately reproduce the actual inundation area without incorporation of micro embankments. On the other hand, the calculated inundation area of 50m grid model without micro embankments spread wider than the actual inundation area. Therefore, the study proposed a method to efficiently set micro embankments for 50m grid model and confirmed that it is possible to secure sufficient prediction accuracy and short calculation time required for practical application.

Key Words : *Inundation prediction, Micro embankment, Internal boundary condition*

1. はじめに

近年, 日本各地において洪水氾濫等による水災害が多発しており, 最近では平成25年7月の山口・島根豪雨や, 平成25年9月に滋賀県及び京都府で発生した台風18号による災害等が記憶に新しい。

洪水氾濫時に行うリアルタイム浸水予測は, クラウド・マネジメントのための一つ的手段として期待されている。その目的は人的被害や資産被害の最小化であり, 特に人的被害については, 避難が必要な住民等のみならず, 避難誘導や救助活動を行う消防等機関にとっても, 浸水予測結果は重要な基礎情報となる。著者らが実際に浸水被害を経験した自治体に対しヒアリングを行った結果でも, 避難誘導や救助活動場所, そこへの移動手段や経路に関する一

次検討時に, 浸水予測が非常に重要な基礎情報と自治体が認識していることが分かっている。つまり, 消防関係機関の初動をいち早く実行に移すことが人的被害の更なる軽減につながり, 浸水予測はそれに貢献する手段としても位置づけられる。また, 上記の活用目的から, 浸水予測には即時性と精度の両立が求められていることは明らかである。

氾濫予測手法についてはこれまで, 様々な知見が明らかになってきたとともに, 多くの手法が提案されてきた^{1)~8)}。これらの研究は高精度の結果を得ることに主眼が置かれており, 必ずしも即時性も同時に有する方法とはなっていない。これらに対し, 安田ら⁹⁾は, 田畑の畦といった微高地の存在が浸水域の変化に大きく影響を及ぼす点に着目し, 地形適合格子を用いた浸水予測計算モデルを開発し, 即時

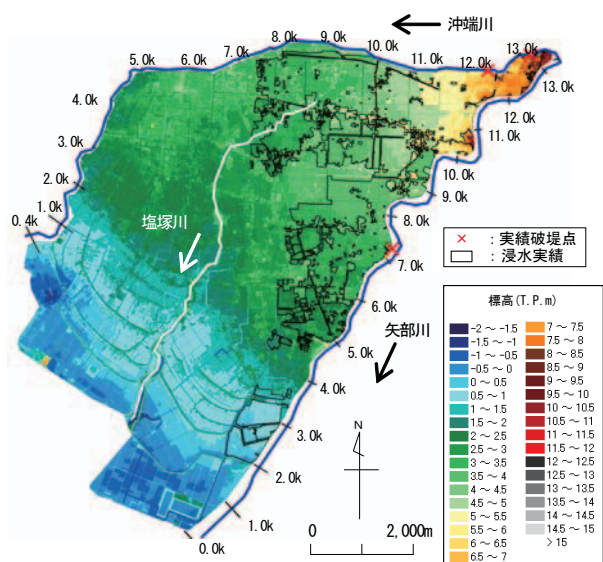


図-1 対象流域の標高分布および2012年7月洪水浸水実績

性と精度の両立を試みた。星野ら¹⁰⁾は四分木法による河道・氾濫原一体型解析法を構築し、即時性に最大限配慮しつつ、局所的な高解像度化が可能となる計算法を提案した。これらの知見より、即時性と精度を両立するためには、空間解像度が比較的大きな条件においては氾濫水の流況に影響を及ぼす微高地を適切に考慮すべきであるとの結果が得られているが、実務において考慮すべき範囲と精度の関係についての知見は得られていない。また三浦ら¹¹⁾の研究では、メッシュサイズが大きくなるほど隣り合うメッシュとの地盤高差が大きくなることに起因する段落ち流れ計算が行われる結果、メッシュ間流量が理論上最大となり、氾濫水が浅く広範囲に拡散することが示されており、メッシュサイズの大きいモデルを使用する場合はメッシュ間の比高差についても留意が必要である。

以上のことから、リアルタイム洪水予測システムで使用するメッシュスケールには、即時性と精度というトレードオフが存在する。国土交通省手引¹²⁾においては50m程度が目安とされており、その場合は氾濫流に影響を及ぼす微高地を適切に取り込むことが重要となる。しかしながら、取り込むべき微高地の条件については、氾濫シミュレーション・マニュアル(案)⁵⁾などにより「平均地盤高からの比高が50cm以上のもの」を原則とするなどの目安が示されているものの、明確な根拠は示されていない。

本研究では、実務上広く用いられている矩形格子による平面二次元不定流計算手法を対象とし、予測に必要な即時性と精度を両立するため、メッシュ内部の微高地を線状盛土と同様な内部境界条件として反映する手法について検討するものであり、比較的スケールの大きいメッシュにおいて、内部境界条件として取込む道路盛土等の微高地の抽出方法の違いが計算結果に与える影響を調べた。また、それらの計算精度の比較より即時性および精度を確保するために必要となる内部境界の設定手法および基準について設定を行った。

2. 細密メッシュにおける微高地の表現方法

まず再現精度による知見を得るために、LP (Laser Profiler) データから一般的に得られる最高分解能の5mメッシュによる実績浸水の再現計算により、細密メッシュによる浸水実績範囲の再現精度を確認した。

(1) 対象とする流域および浸水実績

福岡県内を流れる矢部川水系において、2012年7月14日の梅雨前線豪雨により、観測史上最高の水位を記録する洪水が発生した。矢部川船小屋水位観測所において約5時間にわたり氾濫危険水位を超過し、矢部川とその派川沖端川の堤防のうち計3箇所が決壊、柳川市とみやま市において約1,800戸の家屋・事業所等が浸水するなど甚大な被害が発生した¹³⁾。本研究では、この浸水被害を受けた地域のうち、破堤の生じた矢部川下流右岸(矢部川と沖端川に囲まれた流域(図-1))を対象とした。対象地域は地形勾配が概ね1/1000以下であり、南西方向に位置する有明海に向かい地盤高が低くなる特徴を持つ。広く分布する水田に住宅地が点在しており、田畑の間を通る道路や畦等の比高が50cm程度以下の小規模な線状盛土(以下、微高地)が浸水域の拡大過程に影響を及ぼすものと考えられる。また、用水路網が平面的に密に発達していることも対象流域の特徴である。

(2) 計算方法と微高地のモデル化

浸水域の再現計算には、建物の存在を透過率及び抵抗として考慮し、直交座標系平面二次元不定流の基本式¹⁴⁾を用いた。なお河道内水位を一次元不定流解析により求め、境界条件として上流端には矢部川船小屋地点(河口から15.3km)の流量ハイドログラフ、下流端には有明タワー総合観測地点の実績潮位を与えた。また沖端川への分派流量比は2012年7月洪水における河道平面二次元解析による再現結果より0.112とし、矢部川と沖端川の間を南下する塩塚川については、洪水分担流量がないため、発散しないための必要流量 $10\text{m}^3/\text{s}$ を上流端に与えた。破堤氾濫流量および越流量は本間の越流公式⁵⁾より求めた。

地盤高は5mメッシュのLPデータ(グラウンドデータ)により与え、粗度係数は土地利用ごとに栗城等⁵⁾に従い設定した。幅の広い道路については、道路上の延長方向の流れを表現するため、該当するメッシュの透過率を100%として道路上の高流速を表現するよう設定した。

(3) 浸水現象の再現

5m四方の計算メッシュを作成し、図-1に示す浸水域の再現計算を実施した。河道の上下流端に与えた流量、潮位を図-2(上段)に示す。堤防の決壊地点は実績(図-3の×印)のとおりとし、そこから流出した氾濫流量ハイドログラフは図-2(下段)のように計算された。この場合、微高地は5mメッシュ地盤高により表現されていると考えられるため、微高

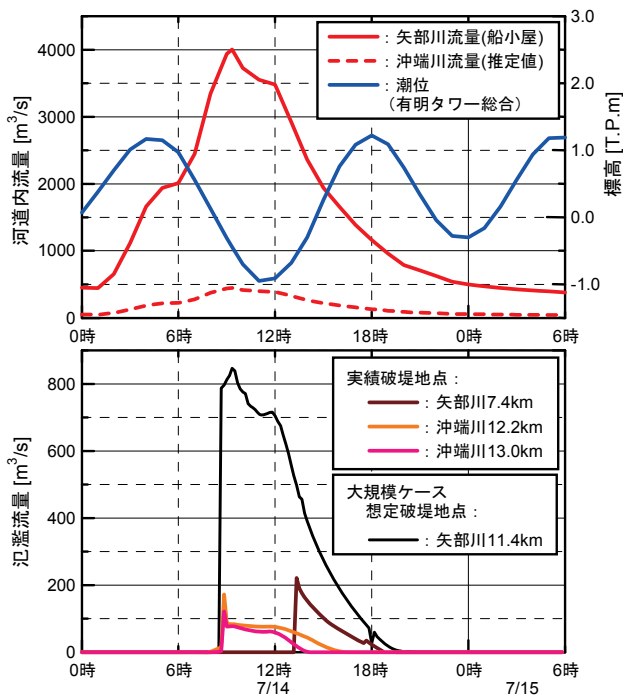


図-2 境界条件として与えた流量・潮位ハイドログラフ
および氾濫流量ハイドログラフ

地に対応する内部境界条件は設定しない。また、用水路は地形の凹地として連続的に設定した。

浸水実績再現計算結果を図-3に示す。氾濫水の先端位置の再現性が高いことがわかる。なお計算結果の時系列より、沖端川からの氾濫流は主に西方向、矢部川からの氾濫流は主に南西方向に拡大していることを確認した。標高分布からもこの氾濫流の動きは妥当であることから、実際の氾濫においても同様であることが示唆された。また、南端付近において他の浸水域と分離された浸水域が存在するが、再現計算結果から、用水路を経由して氾濫水が到達し浸水に至ったことが示唆された。このことから、主に農地である対象範囲に類似したエリアを対象とし、精度の高い浸水予測結果を得るためには、密な用水路網を適切に表現することの必要性が示唆される。次に図-3の一部地域(赤点線で表示)を拡大し、図-4に示す。中央部において東西方向に延びる道路付近で浸水範囲が分かれており、その状況が再現計算でもよく表れている(図-4(a))。当該道路付近の地盤高は、周辺に比べ高く、この連続した微高地により、氾濫水の南下が抑制された結果、西方向に進行していった(図-4(b))。このように、5mメッシュを用いることによって、微高地盛土が表現され、再現精度が確保できることが分かる。一方、計算期間(24時間)に対し、5mメッシュを用いた計算時間はほぼ同じ時間(24時間)を要する。

3. 大スケールメッシュにおける微高地の表現方法

(1) 微高地盛土の取込方法および再現計算

リアルタイム浸水予測には精度に加え即時性も併

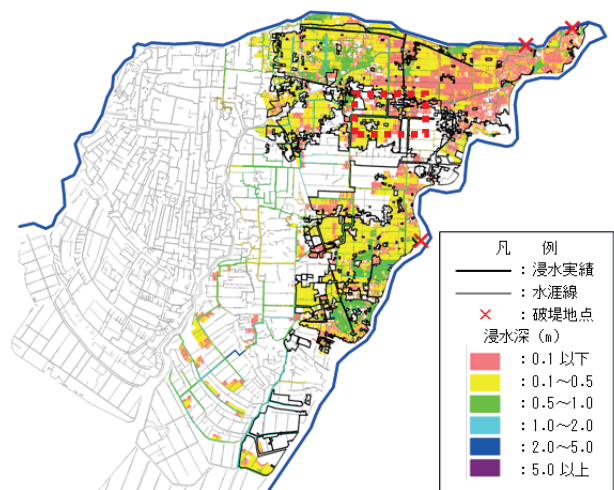


図-3 5mメッシュでの再現計算結果

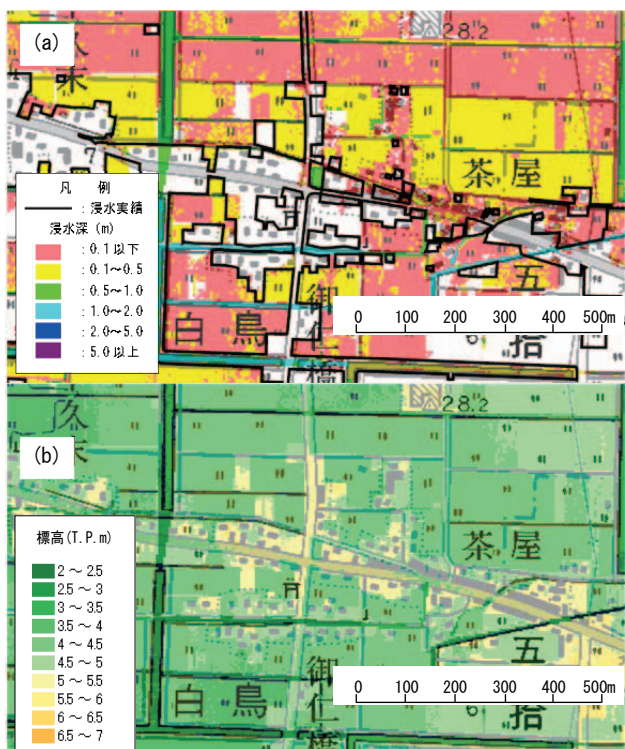


図-4 5mメッシュでの再現計算結果(a)と標高分布図(b)
(図-3の赤点線で示した領域を拡大表示)

せて求められるが、現状5mメッシュでの計算では即時性は確保できない。計算時間を短縮しつつ精度を向上させる方法として、比較的大きいメッシュを作成し、メッシュ境界に内部境界条件として微高地を取り込むことが一つの有力な方法となる。

そこで、50mメッシュを作成し微高地の取り込み方法の違いによる再現性の差異を調べた。なお、畦や農道などの連続的な微高地の塞ぎ止め効果を表現するために連続盛土(内部境界)を設定する。粗度係数による調整に比べて、本対象域のように流速の小さい場合にも有効であり、浸水深に対する微高地の凹凸のスケールが粗度の適用範囲を超えており湛水状態が表現可能である点で有利である。

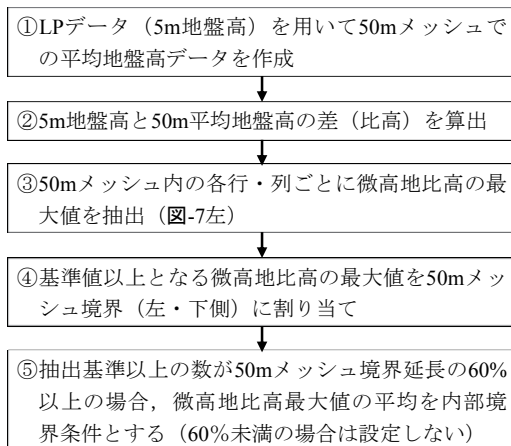


図-5 盛土作成フロー（串刺方式）

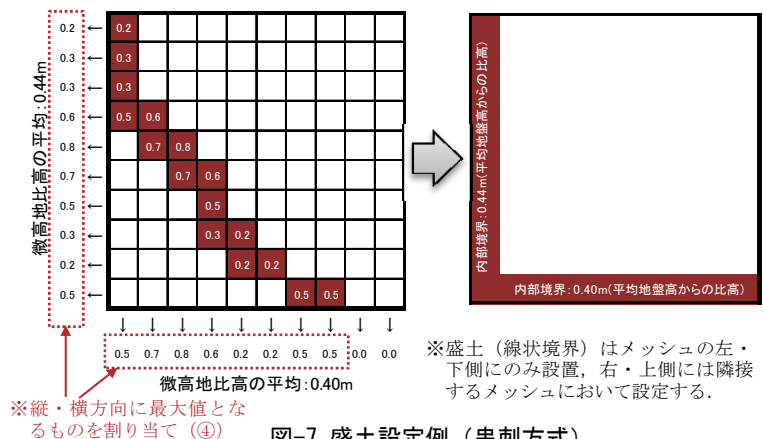


図-7 盛土設定例（串刺方式）

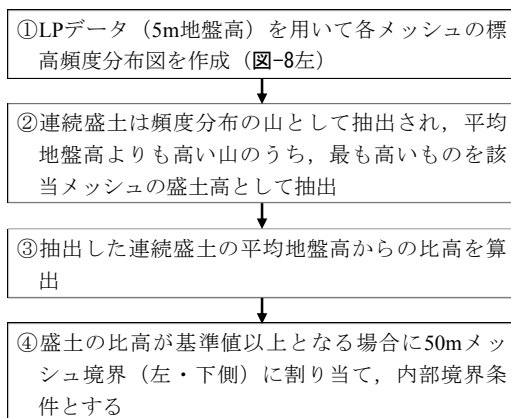


図-6 盛土作成フロー（標高分布方式）

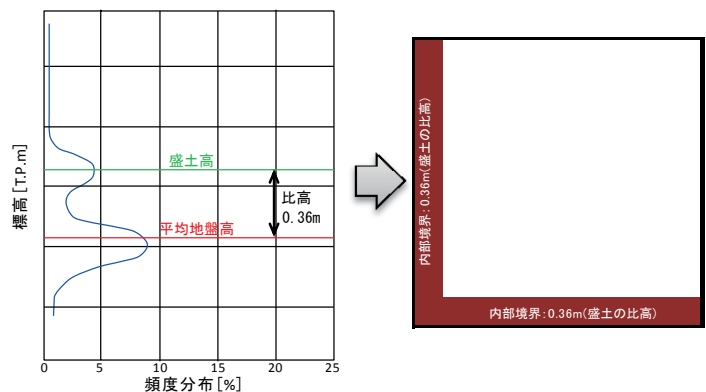


図-8 盛土設定例（標高分布方式）

計算条件として、50mメッシュでは、そのスケールから用水路を直接的に表現できないため、再現性確認のための基準ケースは、用水路の連続性を考慮しない5mメッシュでの計算結果を用いている。

ここでは、微高地をシステムティックに内部境界条件を抽出・設定するために“串刺方式”と“標高分布方式”の2方式を考えた。それぞれの盛土作成フローを図-5、図-6、設定例を図-7、図-8に示した。これらの方法は特に広域を対象とする場合に、効率的に微高地盛土をモデル化することができる。

串刺方式による微高地比高の抽出基準値を、それぞれ0.1m、0.2m、0.3m、0.5m以上の4ケースと、標高分布方式（抽出基準高0.2m）および微高地を取り込まないケースを合わせた計6ケースを設定し、再現計算を実施した。ここで、盛土を内部境界条件としてメッシュ境界に設定した場合、メッシュ間流量を本間の越流公式⁵⁾により計算している。

これらのうち、串刺方式において微高地比高の抽出基準値を0.2m、0.5m以上とした場合と標高分布方式の結果を5mメッシュの計算結果と併せて図-9に示す。串刺方式による抽出基準値0.2m以上の場合、基準ケースで得た浸水範囲を比較的良好に再現できている。抽出基準値がそれらより大きいケースおよび標高分布方式においては浸水範囲が基準ケースより広がる傾向にある。次に、各ケースの浸水面積および浸水ボリュームの時系列を図-10に示す。浸水

ボリュームについては各ケースとも一致している。また50mメッシュにおける微高地比高の基準値を0.2m以上、0.3m以上とした場合の浸水面積の時間変化は、基準ケース（5mメッシュ）のそれとよく一致している。一方で、微高地を抽出しない条件、微高地比高の抽出基準値を0.5m以上としたケースの浸水面積は、基準ケースを大きく上回っている。これは、比高の大きいもののみ抽出したことにより、本来氾濫流の流下を抑制している微高地がメッシュ平均地盤高に内包され、地形が平滑化されたことが要因である。また、抽出基準値を0.1mまで小さくすると、浸水面積が過小評価となっている。これは、抽出基準を細かくし過ぎるとメッシュ内の地盤勾配による比高差も盛土として抽出・設定されるためであり、地盤勾配によるメッシュ内の標高差より大きな範囲で設定する必要がある。また、標高分布方式は平均地盤高以上で標高分布の大きい高さを盛土高として設定するため地形の線的な情報が得られず、盛土の天端高を正確に捉えることができない。このため、盛土高が過小評価となり浸水面積が拡大している。以上のことから、対象地域のように微高地が氾濫流の挙動に影響を及ぼす場合、内部境界条件として取り込む微高地比高の基準値はメッシュ内の地盤勾配による標高差より大きな範囲で、できるだけ小さくし、より多くの微高地を表現することで精度向上が期待できる。

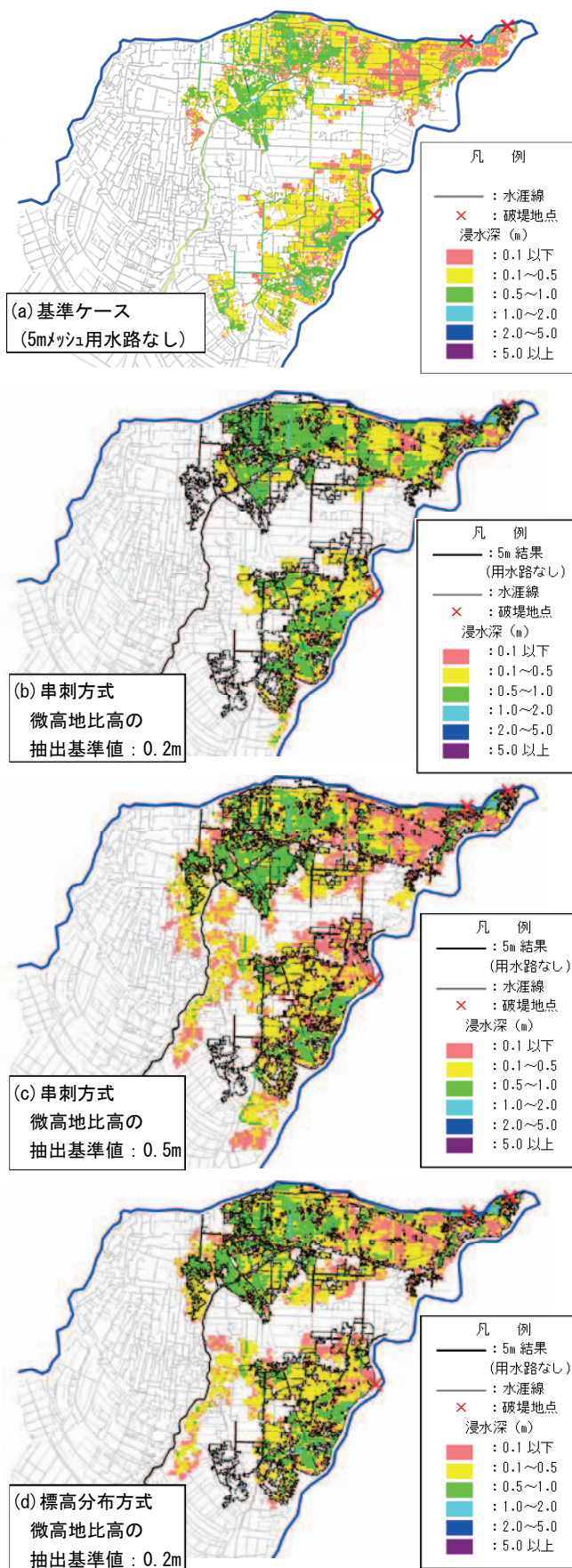


図-9 基準ケースと内部境界条件として取り込んだ微高地比高の基準値の違いによる計算結果の差異

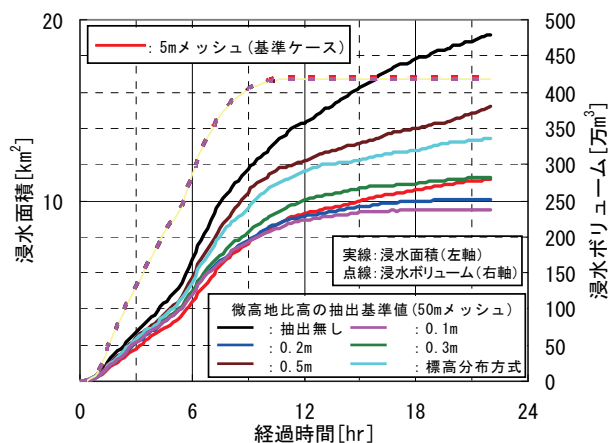


図-10 浸水面積の時間変化 (再現ケース)

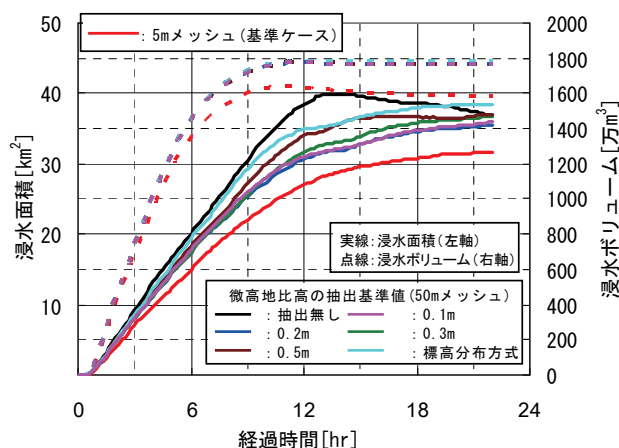


図-11 浸水面積の時間変化 (大規模ケース)

これらの50mメッシュのケースでは、盛土の有無にかかわらず、24時間先までの予測計算を5分程度で行っており、精度と即時性を両立できる実用的な手法である。

(2) 氾濫ボリューム規模の相違に対する分析

これまで(1)で述べた比較分析は、3地点からの氾濫であるものの、洪水通減期に発生した氾濫事象であり、氾濫ボリュームが比較的小さい。そこで本節では、氾濫ボリュームが(1)に比べ大規模な場合において、内部境界条件として抽出した微高地の違いが浸水計算結果に及ぼす影響を比較した。ここで破堤想定地点は、流下能力が低く対象地域上流端付近に位置する矢部川11.4km地点右岸とし、図-2下段に示す再現条件に比べて大きな氾濫流量となる条件で実施した。以降、(1)の条件を再現ケース、本節で用いた氾濫ボリュームを大規模ケースと呼ぶ。

大規模ケースの浸水面積と浸水ボリュームの時系列を図-11に示す。ここで、5mメッシュとその他のケースでは堤内側の微地形の影響により浸水ボリュームが異なり若干の差が出ている。串刺方式による大規模ケースの浸水面積は抽出基準値の違いにより若干の差はあるものの、いずれも5mメッシュで得られた浸水面積に比べ1割程度大きくなっているが、抽出基準値の違いによる浸水面積に大きな差

は見られない。一方、図-10の再現ケースにおいて、抽出基準値が0.1mと0.5mの比較では約5割の浸水面積の差が生じている。これらの理由として、50mメッシュを用いることにより地形が平滑化されることにより氾濫水が拡がりやすくなっているが、流量規模が小さい再現ケースの方が微高地の反映による影響が大きいことによるものである。また、大規模ケースにおいて抽出基準の違いにより浸水面積が大きく異なる理由については、再現ケースに比べ浸水深スケールが増大し、微高地の影響が比較的小さくなったためである。このように微高地の影響は氾濫ボリュームが大きくなるほど小さくなる傾向にある。なお、図-11の抽出無しにおける浸水面積の減少は、氾濫流が海岸沿いの防潮堤まで達して貯留するためである。

本手法の適用においては、流域特性に応じた微高地の抽出基準値を設定する必要があるため、予めいくつかのケース（特に、微高地が大きく影響する氾濫流量の小さいケースで検証することが重要）で計算を行い、5mメッシュでの結果を最もよく再現できるメッシュサイズおよび内部境界条件（抽出する微高地比高の基準値）を設定することが望ましい。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 5mメッシュでは、微高地の存在による地形の凹凸が地盤高として直接的に表現されることにより地形が氾濫流に及ぼす影響をよく説明できる。これらは畦や農道などの連続的な微高地によって流水が塞ぎ止められるためである。
- 2) これらの連続的な微高地を表現するために、連続盛土（内部境界）として設定する必要がある。対象流域では、微高地を“串刺方式”により取り込んだ結果、比較的大きい50mメッシュであっても良好な再現性が得られた。取り込む微高地の抽出基準値はメッシュ内の地盤勾配による標高差より大きな範囲で、できるだけ小さくすることで、より細密な浸水解析と同等の計算結果が得られた。
- 3) 内部境界条件として取り込む微高地の比高（基準値）の違いによる浸水範囲は、氾濫ボリュームが大きいほどその影響が小さくなる。これは、浸水深スケールが微高地比高に対して大きくなるため、相対的に微高地の影響が小さくなるためである。
- 4) 比較的大きなメッシュを用いて浸水予測モデルを構築する場合、5mメッシュでの結果が最もよく再現できるメッシュサイズおよび内部境界条件（抽出する微高地比高の基準値）の組合せを得ることが技術的に妥当な手法といえる。
- 5) 微高地を内部境界条件として取り込む実用的な方法として2種類の方法を提案した。このうち、串刺方式によりシステムティックに内部境界条件を抽出・設定することを可能とし、特に広域

を対象とする場合において有効である。

今後の課題としては、以下のことがある。

- 1) 大きなメッシュサイズを採用する場合における用水路などの反映方法については今後の課題である。
- 2) 他流域（都市流域など）における微高地盛土の設定方法についても検証し、流域の特性（勾配、土地利用など）に応じた汎用的な微高地盛土設定方法を検討する必要がある。

謝辞：本研究の実施にあたり、国土交通省九州地方整備局より、貴重な各種調査データを提供いただきました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 岩佐義朗・井上和也・水島雅文：氾濫水の水利の数値解析法，京都大学防災研究所年報，第23号B-2，pp.305-317，1980。
- 2) 福岡捷二・川島幹雄・松永宣夫・前内永敏：密集市街地の氾濫流に関する研究，土木学会論文集，No.491/II-27，pp.51-60，1994。
- 3) 福岡捷二・川島幹雄・横山洋・水口雅教：密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究，土木学会論文集，No.600/II-44，pp.23-36，1998。
- 4) 末次忠司・栗城稔：改良した氾濫モデルによる氾濫流の再現と防災への応用に関する研究，土木学会論文集，No.593/II-43，pp.41-50，1998。
- 5) 栗城稔・末次忠司・海野仁・田中義人・小林裕明：氾濫シミュレーション・マニュアル（案）—シミュレーションの手引き及び新モデルの検証—，土木研究所資料，第3400号，1996。
- 6) 戸田圭一・井上和也・村瀬賢・市川温・横尾英男：豪雨による都市域の洪水氾濫解析，土木学会論文集，No.663/II-53，pp.1-10，2000。
- 7) 川池健司・井上和也・林秀樹・戸田圭一：都市域の洪水氾濫モデルの開発，土木学会論文集，No.698/II-58，pp.1-10，2002。
- 8) 秋山壽一郎・重枝未玲：河道・氾濫原包括解析による氾濫流量の評価と市街地破堤氾濫解析，土木学会論文集B，Vol.63，No.3，pp.224-237，2007。
- 9) 安田浩保・白土正美・後藤智明・山田正：水防活動の支援を目的とした高速演算が可能な浸水域予測モデルの開発，土木学会論文集，No.740/II-64，pp.1-17，2003。
- 10) 星野剛・西家健宏・小関博司・安田浩保：解析コストの効率化を目的とした河道・氾濫原一体型解析法の提案，河川技術論文集，第19巻，pp.331-336，2013。
- 11) 三浦心・川村育男・木村一郎・三浦敦禎：扇状地に発達した密集市街地における氾濫解析手法に関する検討，水工学論文集，第55巻，pp.S979-S984，2011。
- 12) リアルタイム浸水予測シミュレーションの手引き（案），国土交通省 河川局，2005.6。
- 13) 国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所，<http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/old/kisha/25/250606.pdf>，2013.6。
- 14) 国土交通省：浸水想定区域図作成マニュアル（改訂版）（案），2013.11。

（2014.4.3受付）